



Monika ORZECZOWSKA*, Marcin MALEC**, Przemysław KASZYŃSKI**

Krótkoterminowa analiza zmian struktury wytwórczej polskiego sektora elektroenergetycznego przy użyciu usługi ModWEEL

Streszczenie: W artykule przedstawiono oraz szczegółowo omówiono wyniki dwóch symulowanych analiz scenariuszowych polskiego sektora wytwórczego. Symulacje przeprowadzone przez autorów wykonano przy użyciu usługi krótkoterminowego Modelu Sektora Wytwarzania Energii Elektrycznej (ModWEEL), dostępnej na portalu Polskiej Infrastruktury Gridowej (PL-Grid) w ramach platformy dziedzinowej Energetyka. W narzędziu odwzorowano strukturę polskiego sektora wytwarzania energii elektrycznej z uwzględnieniem pojedynczych jednostek wytwórczych, przyjmując godzinową rozdzielczość czasową oraz biorąc pod uwagę ograniczenia techniczne, ekonomiczne i środowiskowe. Autorzy poruszają problem wpływu zmian struktury wytwórczej polskiego sektora elektroenergetycznego na funkcjonowanie i skutki dla tego sektora.

W pierwszym rozdziale przedstawiono opis usługi ModWEEL. Następnie, w rozdziale drugim, opisano przyjęte założenia scenariuszowe. Rozdział trzeci zawiera analizę otrzymanych wyników symulacji komputerowych.

Słowa kluczowe: wytwarzanie energii elektrycznej, mix paliwowy, modelowanie, emisje zanieczyszczeń

Short-term analysis of generation structure changes in the Polish power sector using ModWEEL grid service

Abstract: The article presents and discusses the results of two scenario analyses of the Polish power sector. Simulations were conducted using the short-term model of the Polish power generation sector (ModWEEL) grid service, which is available on the portal for the Polish Grid Infrastructure (PL-Grid) in the domain of Power Engineering. ModWEEL reflects the structure of the Polish power generation sector, including single power units, an hourly resolution as well as technical, economic and environmental constraints. The impact of changes in the installed capacity structure of the Polish power generation sector on the functioning of this sector is discussed.

* Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Pracownia Zrównoważonego Rozwoju Gospodarki Surowcami i Energią, Kraków; e-mail: monika.orzechowska@min-pan.krakow.pl.

** Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Pracownia Ekonomiki Energetyki, Kraków; e-mail: malec@min-pan.krakow.pl; kaszynski@min-pan.krakow.pl.

Apart from the introduction and conclusion sections, the presented paper consists of three chapters. The first chapter describes the ModWEEL tool. Then, the scenario assumptions are presented in the second chapter. Chapter 3 includes the analysis of the computer calculation results.

Keywords: electricity generation, fuel mix, modelling, pollutant emissions

Wprowadzenie

Postępująca zmiana struktury wytwórczej polskiego sektora elektroenergetycznego w najbliższych latach może spowodować zmianę krajowego mixu paliwowego. Rozwój niskoemisyjnych technologii węglowych, ekspansja odnawialnych źródeł energii i źródeł opalanych gazem ziemnym oraz możliwość inwestycji w energetykę jądrową będą wywierać wpływ na zmianę całkowitych kosztów zmiennych funkcjonowania sektora oraz poziom emitowanych do środowiska zanieczyszczeń.

Głównym celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie usługi ModWEEL, pod kątem możliwych do przeprowadzenia przy jej pomocy analiz polskiego sektora wytwarzania energii elektrycznej. W tym celu przygotowano zestawy danych dla scenariuszy badawczych oraz przeprowadzono symulacje dla okresów dwutygodniowych, dla różnych pór roku. Praca, oprócz wstępu i podsumowania, składa się z 3 głównych rozdziałów. W pierwszym rozdziale zawarto opis usługi ModWEEL, rozdział drugi zawiera najważniejsze założenia scenariuszowe, natomiast w rozdziale trzecim przeanalizowano otrzymane wyniki obliczeń.

Warto zauważyć, że dla polskich warunków już we wcześniejszych latach przygotowano analizy scenariuszowe z zakresu kształtowania się krajowego mixu paliwowego (Ministerstwo Gospodarki 2011; Departament Analiz Strategicznych 2013). Wymienione pozycje są analizami długoterminowymi, natomiast za pomocą usługi ModWEEL można przeprowadzić symulacje krótkoterminowe – w skali jednego roku – w rozdzielczości godzinowej. Z tego względu nie jest możliwe porównanie wyników z wymienionych pozycji do efektów uzyskanych przez autorów. Tematyka modelowania systemów energetycznych była poruszana do tej pory w wielu pracach naukowych, m.in. (Kudelko 2003; Kamiński 2010; Suwała 2011; Szczerbowski 2014).

1. Model sektora wytwarzania energii elektrycznej – ModWEEL

Polska Infrastruktura Gridowa powstała w ramach projektu PL-Grid (2009–2012) w celu dostarczenia polskiej społeczności naukowej platformy informatycznej opartej na klastrach komputerów, służących e-Science w różnych dziedzinach (PL-Grid a.). Infrastruktura PL-Grid to część paneuropejskiej infrastruktury tworzonej w ramach EGI (*European Grid Initiative*), która ma na celu połączenie narodowych platform gridowych w jedną stabilną infrastrukturę (Mirowski i in. 2014). W skład konsorcjum Polskiej Infrastruktury Gridowej wchodzi: Akademickie Centrum Komputerowe Cyfronet AGH w Krakowie, Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego w Warszawie, Instytut Chemii Bioorganicznej PAN – Poznańskie Centrum Superkomputerowo Sieciowe w Poznaniu, Centrum Informatyczne Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej w Gdańsku oraz Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe we Wrocławiu.

Struktura ta składa się z platform dziedzinowych – omawiana w artykule usługa ModWEEL dostępna jest w ramach platformy Energetyka. Ponadto, w gridzie Energetyka istnieje możliwość uzyskania dostępu do dwóch innych usług umożliwiających modelowanie sektora paliwowo-energetycznego, tj. model zintegrowanego modelowania rozwoju systemów energetycznych (π ESA) (Wyrwa i in. 2014) oraz system optymalizacji produkcji w podziemnych kopalniach węgla kamiennego stosujących ścianowy system eksploatacji (OPTiCoalMine).

1.1. Charakterystyka usługi ModWEEL

Krótkoterminowy model sektora wytwarzania energii elektrycznej (ModWEEL) – to usługa umożliwiająca przeprowadzenie symulacji (maksymalnie jeden rok w rozdzielczości godzinowej) funkcjonowania polskiego sektora wytwórczego. Użytkownicy mają możliwość zmiany parametrów technicznych istniejących jednostek wytwórczych oraz aspektów ekonomicznych i środowiskowych ich funkcjonowania, a w efekcie mogą obserwować następstwa wprowadzonych zmian z punktu widzenia całego sektora. Obliczenia wykonywane są przy pomocy systemu modelowania GAMS (*General Algebraic Modeling System*), który wykorzystuje zaawansowane solwery rozwiązujące numerycznie model.

Cechą wyróżniającą wspomnianą usługę jest możliwość przygotowania danych wejściowych i zlecenia obliczeń bez specjalistycznej wiedzy z dziedziny modelowania matematycznego. Użytkownicy mogą skorzystać z przygotowanego zestawu danych (plik MS Excel), wprowadzić w nim własne modyfikacje, zlecić obliczenia i otrzymać plik z wynikami. W pliku z danymi wejściowymi do modelu można wprowadzić/edytować między innymi następujące parametry techniczne i ekonomiczne sektora wytwórczego:

- moc jednostki wytwórczej,
- sprawność,
- wskaźniki emisji zanieczyszczeń (pyłów, ditlenku siarki, tlenków azotu, ditlenku węgla),
- wskaźnik współspalania biomasy w jednostkach wytwórczych,
- godzinowy wskaźnik dyspozycyjności,
- wskaźnik wykorzystania mocy,
- minimum techniczne jednostki wytwórczej,
- koszty operacyjne zmienne jednostek wytwórczych,
- ceny paliw wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej,
- ceny pozwoleń na emisję CO₂,
- godzinowe zapotrzebowanie na moc.

Użytkownik poprzez zmianę tych danych może tworzyć scenariusze badawcze, które mogą symulować stan sektora w przyszłości. Przy zastosowaniu usługi ModWELL można otrzymać i analizować następujące wyniki (Kamiński i in. 2013):

- struktura wytwórcza systemu w podziale na jednostki wytwórcze w każdej godzinie analizowanego okresu,
- struktura wykorzystania paliw do produkcji energii elektrycznej w każdej godzinie analizowanego okresu,
- stan pracy indywidualnych jednostek wytwórczych (1 – pracuje, 0 – nie pracuje),

- poziomy emisji ditlenku węgla (CO₂), ditlenku siarki (SO₂), tlenków azotu (NO_x), oraz pyłu(PM), w każdej godzinie analizowanego okresu,
- całkowity poziom emisji CO₂, SO₂, NO_x oraz PM, w analizowanym okresie,
- koszty wytwarzania energii elektrycznej (godzinowe, średnie w danym przedziale czasu, całkowite).

Należy podkreślić, że wykorzystanie tej usługi mogłoby posłużyć jako dopełnienie długoterminowych analiz rozwoju sektora wytwórczego w Polsce (takie podejście metodyczne zostało zastosowane w pracy Gawlik red. 2013).

2. Analiza scenariuszowa

Badanie przeprowadzono w skali dwutygodniowej dla okresów każdej z pór roku. Wybrano referencyjne tygodnie z I, IV, VII oraz X miesiąca roku kalendarzowego. Zapotrzebowanie na moc elektryczną przyjęto w rozdzielczości godzinowej dla danych z roku 2014 (PSE 2014), ceny nośników energii pierwotnej przyjęto jako bieżące z roku 2013, z uwagi na brak pełnych danych za 2014 rok (ARE 2014), natomiast ceny uprawnień do emisji CO₂ w scenariuszu referencyjnym przyjęto na podstawie historycznych wartości z roku 2014 (opracowanie własne na podstawie CIRE 2014). Bilans importu i eksportu mocy założono równy 0, dlatego nie wpływa on na poziom generowanej przez sektor energii elektrycznej. Uwzględniono także godzinowe wskaźniki dostępności mocy dla elektrowni wiatrowych oraz fotowoltaicznych.

Na potrzeby niniejszej analizy przygotowane zostały dwa scenariusze badawcze, będące hipotetyczną drogą rozwoju sektora wytwórczego w nadchodzących latach, w których zdefiniowano jednostki wytwórcze będące obecnie w budowie. Scenariusze te zostaną odniesione do scenariusza referencyjnego przedstawiającego bieżącą sytuację, uwzględniającą przyjęte założenia.

Scenariusz pierwszy jest odwzorowaniem bliskiej przyszłości, perspektywy kilku nadchodzących lat. Zidentyfikowano plany w zakresie odstawień istniejących jednostek oraz pojawienia się nowych mocy wytwórczych (nowe bloki energetyczne), których budowa jest rozpoczęta lub plany budowy są zaawansowane. Uwzględniono także rozwój technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii (OZE). W zakresie uprawnień do emisji CO₂ przyjęto dwukrotny wzrost cen w stosunku do scenariusza referencyjnego.

Założenia scenariusza drugiego przewidują pojawienie się w systemie elektrowni jądrowej oraz źródeł gazowych, których budowa została już rozpoczęta lub jest ona planowana, wzrost mocy zainstalowanej jednostek wytwórczych OZE, wyłączenie części jednostek wytwórczych bazujących na węglu kamiennym i brunatnym. Ceny uprawnień do emisji CO₂ również przyjęto jako dwukrotność ceny ze scenariusza referencyjnego (dla roku 2014).

W przypadku nowych jednostek OZE, autorzy zwracają szczególną uwagę na jednostki najszybciej rozwijające się w warunkach krajowych, tj. rozwój energetyki wiatrowej.

Na wybór struktury wytwórczej wpływ będzie miała ilość dostępnej mocy w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE). Scenariusz referencyjny zakłada bieżącą strukturę wytwórczą – rysunek 1. W scenariuszu pierwszym wzrasta udział zainstalowanej mocy w energetyce wiatrowej (do około 13%) nieznacznie spada udział elektrowni opartych na

TABELA 1. Założenia scenariuszowe

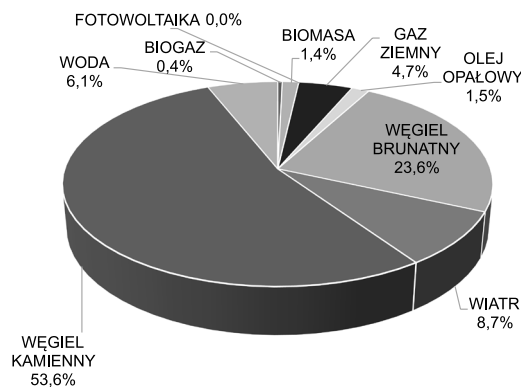
TABLE 1. Scenario assumptions

Scenariusz referencyjny	Scenariusz 1	Scenariusz 2
Sytuacja bieżąca – rok 2014	– bloki w Opolu, Koźmienicach, Turowie, Jaworznie	– bloki w Opolu, Koźmienicach, Turowie, Jaworznie, Stalowa Wola (gaz), Gorzowie (gaz), Włocławku (gaz), Płocku (gaz) oraz Puławach (gaz)
	– wyłączenia związane z PPK (Adamów, Konin*, Skawina*) oraz Belchatów* Siersza*, Łagisza*, Dolna Odra*, Stalowa Wola*, Pątnów*	– wyłączenia związane z PPK (Adamów, Konin*, Skawina*), Belchatów* oraz Siersza*, Łagisza*, Dolna Odra*, Stalowa Wola*, Pątnów*, Połaniec*, Łaziska 2*
	OZE (2 GW – wiatr)	OZE (6 GW – wiatr; 0,5 GW – PV)
	brak elektrowni jądrowej	elektrownia jądrowa 3 GW
	ceny uprawnień do emisji wzrastają dwukrotnie	ceny uprawnień do emisji wzrastają dwukrotnie

* Wybrane bloki

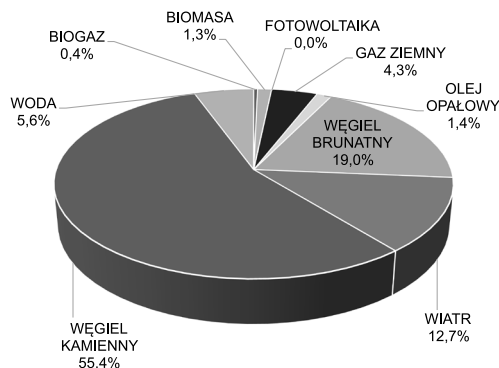
Źródło: opracowanie własne

węgla brunatnym (co ma związek z wyłączeniem bloków w Adamowie, Koninie oraz Belchatowie), a udział elektrowni opartych na węglu kamiennym jest stabilny ze względu na budowę nowych jednostek wytwórczych – rysunek 2. W scenariuszu drugim, w porównaniu do scenariusza referencyjnego, wzrasta udział zainstalowanej mocy w energetyce wiatrowej, energetyce jądrowej i elektrowniach zasilanych gazem ziemnym, a widoczny spadek następuje w mocach zainstalowanych elektrowni węglowych – rysunek 3.



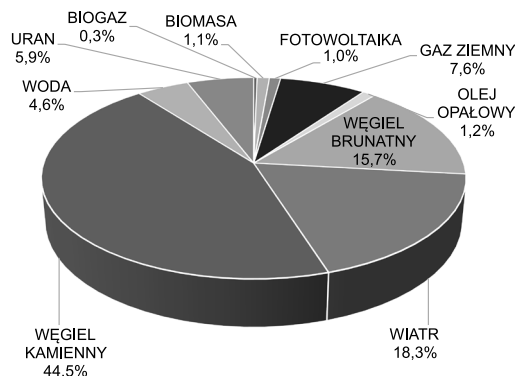
Rys. 1. Zainstalowana moc – scenariusz referencyjny

Fig. 1. Installed capacity – reference scenario



Rys. 2. Struktura mocy zainstalowanej – scenariusz 1

Fig. 2. Installed capacity structure – scenario 1

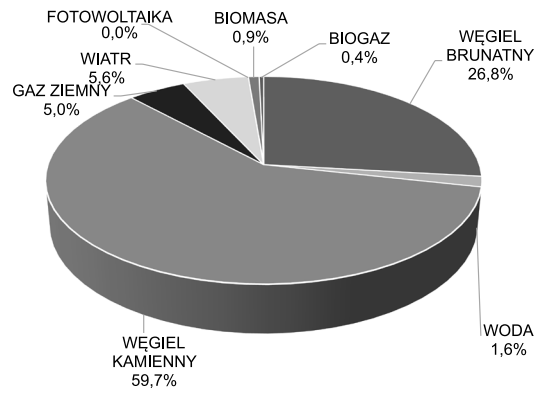


Rys. 3. Struktura mocy zainstalowanej – scenariusz 2

Fig. 3. Installed capacity structure – scenario 2

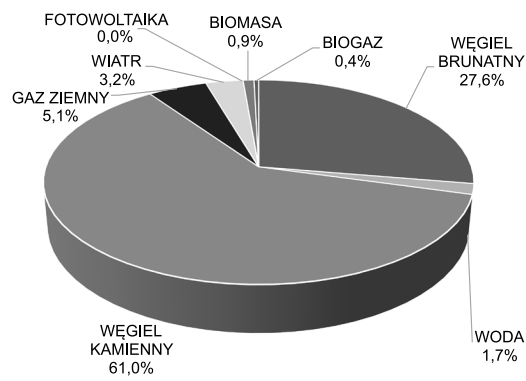
3. Wyniki analiz

Na podstawie wyników badanych scenariuszy analitycznych wyznaczono mix paliwowy wynikający z produkcji energii elektrycznej w dwutygodniowych okresach analizowanych pór roku. Dla scenariusza referencyjnego 0, w celach porównawczych, przedstawiono struktury mixu paliwowego we wszystkich porach roku (wiosna – rysunek 4, lato – rysunek 5, jesień – rysunek 6, zima – rysunek 7). Jak zauważamy, najwyższy udział w produkcji energii elektrycznej w każdym okresie w ciągu roku, zarówno w sezonie letnim, jak i zimowym, posiadają elektrownie węglowe. Udział gazu ziemnego oraz elektrowni wodnych i biomasowych w produkcji energii elektrycznej ulega niewielkim wahaniom. Zmiany w produkcji energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych wynikają z okresów o wyższej generacji wiatru uwzględnionych w założeniach scenariusza.



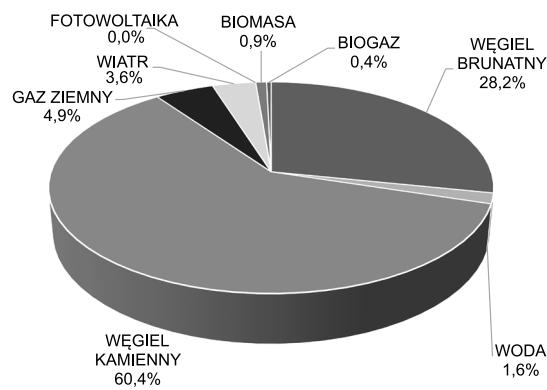
Rys. 4. Mix paliwowy scenariusz referencyjny – wiosna

Fig. 4. Fuel mix reference scenario – Spring



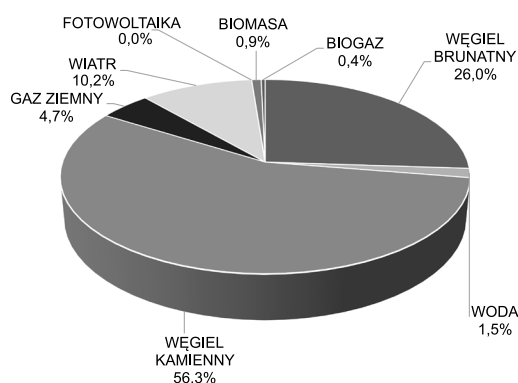
Rys. 5. Mix paliwowy scenariusz referencyjny – lato

Fig. 5. Fuel mix reference scenario – Summer



Rys. 6. Mix paliwowy scenariusz referencyjny – jesień

Fig. 6. Fuel mix reference scenario – Autumn



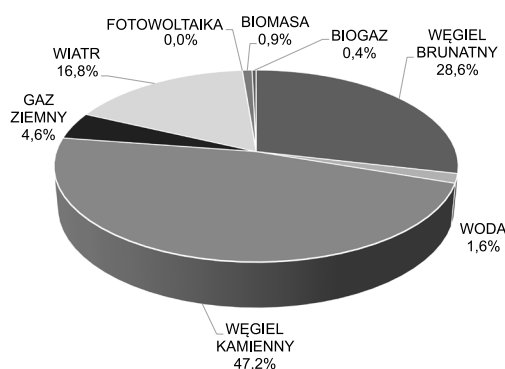
Rys. 7. Mix paliwowy scenariusz referencyjny – zima

Fig. 7. Fuel mix reference scenario – Winter

W dalszej części pracy dokonano analizy zmian w strukturze mixu paliwowego oraz całkowitych kosztów zmiennych wytwarzania energii elektrycznej i emisji zanieczyszczeń porównując wyniki uzyskane w przygotowanych scenariuszach analitycznych w okresach największego zapotrzebowania (okres zimowy). Analizowane scenariusze zostały odniesione do scenariusza referencyjnego (bazowego).

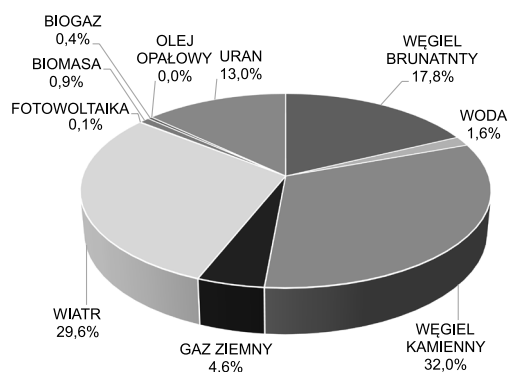
Struktura wytwórcza – mix paliwowy

W odniesieniu do scenariusza bazowego po wprowadzeniu założeń podjętych w scenariuszu pierwszym, zauważalna jest znaczna zmiana w strukturze mixu paliwowego (rys. 8). Wzrost dostępności odnawialnych źródeł energii (w tym przypadku – energetyki wiatrowej) spowodował wzrost udziału wiatru w produkcji energii elektrycznej o blisko 7%, wzrósł też udział węgla brunatnego (wzrost o 2,6%), produkcja energii w elektrowniach wodnych podwyższyła się nieznacznie (wzrost o 0,1%). Spadł natomiast udział węgla kamiennego z 56,3% do 47,2%.



Rys. 8. Mix paliwowy scenariusz 1 – zima

Fig. 8. Fuel mix scenario 1 – Winter



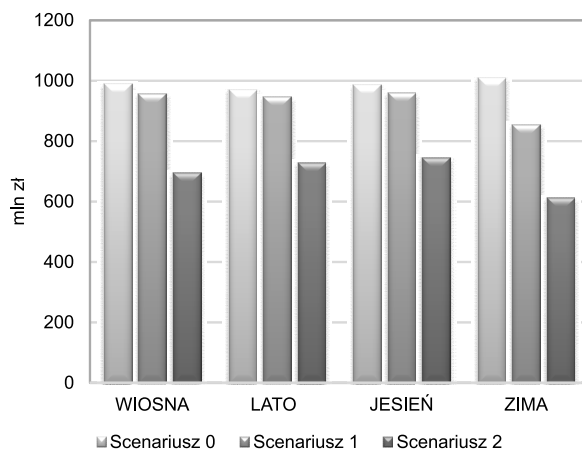
Rys. 9. Mix paliwowy scenariusz 2 – zima

Fig. 9. Fuel mix scenario 2 – Winter

Analizując wyniki mixu paliwowego scenariusza 2 (rys. 9), i porównując go ze scenariuszem bazowym (rys. 7), spostrzec można pojawienie się produkcji energii elektrycznej z paliwa jądrowego (13%) – należy przypomnieć, że w scenariuszu tym została uwzględniona budowa elektrowni jądrowej. Dodatkowo przy założeniu budowy nowych mocy wiatrowych, produkcja energii elektrycznej z tego paliwa osiąga w mixie poziom blisko 30%. Konsekwentnie znacznie spadł udział w strukturze mixu węgla kamiennego – spadek z poziomu 56,3% (scenariusz referencyjny) do 32% (scenariusz 2). Zauważamy również zmniejszenie udziału węgla brunatnego w strukturze o 8,2%.

Koszty

Kolejnym etapem prac była analiza wyników całkowitych kosztów zmiennych sektora poniesionych przy produkcji energii elektrycznej w analizowanych scenariuszach badawczych, w poszczególnych porach roku – rysunek 10.



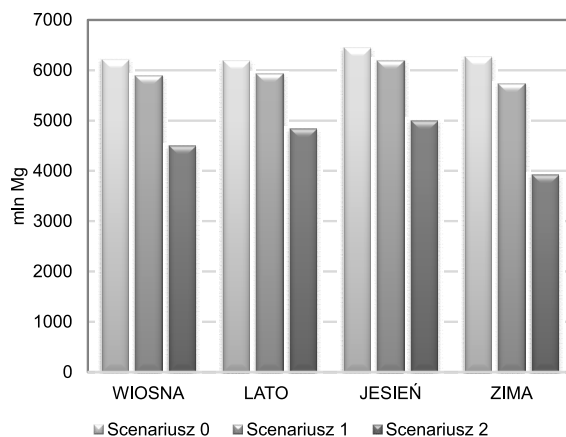
Rys. 10. Całkowite koszty ponoszone przez sektor dla poszczególnych scenariuszy – wiosna, lato, jesień, zima

Fig. 10. Total costs of electricity generation under different scenarios – spring, summer, autumn, winter

Zauważono, że najwyższe koszty w porze wiosennej występują dla scenariusza bazowego, natomiast najbardziej optymalny pod względem kosztów produkcji wydaje się być scenariusz 2, na co wpływ niewątpliwie ma ponad 40-procentowy udział w produkcji energii elektrycznej energetyki wiatrowej i jądrowej. W pozostałych porach roku sytuacja wygląda bardzo podobnie, zarówno dla lata, jesieni i pory zimowej najniższe koszty ponoszone są w przypadku przyjęcia założeń scenariusza 2.

Emisje zanieczyszczeń – CO₂

Następnym krokiem w pracy badawczej jest porównanie wielkości emisji CO₂ w kolejnych przyjętych scenariuszach (rys. 11). Zestawienie to jasno ukazuje zdecydowane zmniejszenie ilości emitowanych do atmosfery zanieczyszczeń w przypadku przyjęcia założeń scenariusza 2, najmniej korzystnie wygląda sytuacja dla scenariusza referencyjnego.



Rys. 11. Wielkość emisji CO₂ dla poszczególnych scenariuszy – wiosna, lato, jesień, zima

Fig. 11. CO₂ emissions under different scenarios – spring, summer, autumn, winter

Podsumowanie i wnioski

Za pomocą usługi ModWEEL przeprowadzono analizę wpływu zmian struktury wytwórczej na funkcjonowanie polskiego sektora elektroenergetycznego dla założonych scenariuszy badawczych. Zmiana struktury mocy zainstalowanej w KSE istotnie wpływa na generowany mix paliwowy sektora.

Porównując okres zimowy do pozostałej części roku, zauważamy wzrost wykorzystania energii pozyskanej z wiatru, na co wpływ ma wzrost siły wiatru w analizowanym okresie. Tym samym w okresie zimowym zmniejszył się udział procentowy w strukturze wytwórczej energii produkowanej w elektrowniach opalanych węglem kamiennym i brunatnym.

Analizując różnice między przyjętymi scenariuszami porównywano jedynie okres zimowy, w którym notowane są szczytowe poziomy zapotrzebowania na moc. Zauważono zmiany w strukturze wytwórczej energii elektrycznej w scenariuszach badawczych po wy-

łączeniu części bloków wytwórczych i wprowadzeniu do KSE dodatkowych mocy zainstalowanych w energetyce wiatrowej (scenariusz 1) oraz energetyce jądrowej i gazowej (scenariusz 2). W tym wypadku udział paliw kopalnych zmalał o około 35%.

Po analizie całkowitych kosztów zmiennych poniesionych podczas produkcji energii elektrycznej przez sektor wytwórczy wynika, że struktura wytwórcza w scenariuszu drugim generuje najmniejsze koszty z punktu widzenia całego systemu. Zmiany założeń tego scenariusza wpłynęły również na zdecydowany spadek ilości emitowanych do atmosfery zanieczyszczeń. Sytuację taką powiązać można z wprowadzeniem nowych bloków zasilanych gazem ziemnym oraz wzrostem udziału energetyki wiatrowej i jądrowej w strukturze wytwórczej i ich ponad 40-procentowy udział w produkcji energii elektrycznej.

Literatura

- ARE 2014 – *Sytuacja techniczno-ekonomiczna sektora elektroenergetycznego*, ARE, 2014.
- Departament Analiz Strategicznych 2013 – *Model optymalnego miks energetycznego dla Polski do roku 2060*. Wersja 2.0, Warszawa.
- Gawlik, L., red. 2013. *Węgiel dla polskiej energetyki w perspektywie 2050 roku – analizy scenariuszowe*. Katowice.
- Kamiński, J. 2010. Modelowanie systemów energetycznych: ogólna metodyka budowy modeli. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 13, nr 2, s. 219–226.
- Kudelko, M. 2003. Efektywna alokacja zasobów w krajowym systemie energetycznym. *Studia, Rozprawy, Monografie* nr 121, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Suwała, W. 2011. *Modelowanie systemów paliwowo-energetycznych*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Kamiński i in. 2014 – Kamiński, J., Kaszyński, P., Mirowski, T. i Szurlej, A. 2014. Krótkoterminowy matematyczny model systemu wytwarzania energii elektrycznej dla warunków Polski. *Rynek Energii* nr 3, s. 44–49.
- Ministerstwo Gospodarki 2011 – *Mix energetyczny 2050. Analiza scenariuszy dla Polski*. Warszawa.
- Mirowski i in. 2014 – Mirowski, T., Kamiński, J. i Wyrwa, A. 2014. Implementacja modeli systemów paliwowo-energetycznych w infrastrukturze PLGrid Plus. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 17, z. 4, s. 217–224.

Źródła internetowe:

- PL-Grid a. – [Online] Dostępne w: <http://www.plgrid.pl/wprowadzenie> [Dostęp: 10.01.2015].
- PSE 2014 – Polskie Sieci Elektroenergetyczne, 2014 – [Online] Dostępne w: <http://www.pse.pl/> [Dostęp: 10.12.2014].
- CIRE 2014 – [Online] Dostępne w: <http://www.handel-emisjami-co2.cire.pl/st,34,283,zakres,5,121,0,komentarze-miesieczne.html> [Dostęp: 10.12.2014].

